

dr hab. inż. Ireneusz Wróbel, prof. UBB  
Katedra Podstaw Budowy Maszyn  
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki  
Uniwersytet Bielsko-Bialski

Bielsko-Biała, 04.10.2023

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Tracza  
pod tytułem

**Modernizacja produkcji elektrody zbiorczej dla przemysłu energetycznego**  
**promotor pracy: dr hab. inż. Krzysztof Waclawiak,**

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak z dnia 12-07-2023

### 1. Wprowadzenie, formalna prezentacja rozprawy

Rozprawa doktorska została napisana na 225 stron maszynopisu formatu A4, składa się z siedemnastu rozdziałów, bibliografii i wykazu norm, spisu rysunków, spisu tablic oraz z trzech załączników. Jest związana z tematyką wytwarzania paneli elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego. Praca doktorska jest rozpatrywana jako osiągnięcie w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna. Należy podkreślić, że praca doktorska ma charakter praktyczny i jest związana z bardzo ważnym dla gospodarki przemysłem energetycznym.

Rozdział pierwszy to wprowadzenie do zagadnienia zawierające genezę zajęcia się przez Doktoranta tematem elektrod zbiorczych elektrofiltrów. W rozdziale drugim przedstawiono tezę i zakres pracy. Sformułowano trzy cele pracy: merytoryczny, użytkowy i naukowy. W rozdziale trzecim zaprezentowano obowiązujące uwarunkowania prawne w dziedzinie ochrony powietrza. Rozdział czwarty i piąty zawiera opis procesu odpylania, podział urządzeń odpylających ze względu na

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia ..... 05.10.2023 .....  
RDJMe/254/51/2023  
nr ..... zał. ....



zjawiska fizyko-chemiczne wykorzystywane do wydzielania pyłu. Zaprezentowano konstrukcję typowego odpylacza elektrostatycznego, opisano jego działanie. Wskazano najważniejsze parametry pracy elektrofiltrów i zależności występujące pomiędzy tymi parametrami. Przedstawiono różne rozwiązania konstrukcyjne elektrod zbiorczych i ulotowych. Wskazano także na ważne aspekty techniczne związane z eksploatacją elektrofiltrów, takie jak: elektryczne zasilanie elektrofiltrów, skład oczyszczanych spalin powiązany z rodzajem spalnego paliwa, usuwanie osadu pyłu z elektrod i sprawność odpylania. W rozdziale szóstym Doktorant przedstawił bieżącą sytuację na rynku energetycznym i tendencje rozwojowe budowy elektrofiltrów. Omówił najważniejsze kierunki rozwojowe odpylaczy związane z aspektami eksploatacyjnymi oraz z konstrukcją samych odpylaczy. Rozdział siódmy pod tytułem: *Stan badań dotyczących konstrukcji, działania i projektowania elektrofiltrów* to przegląd literatury związany z symulacjami numerycznymi wytwarzania (profilowania) elektrod elektrofiltrów oraz związany z symulacjami numerycznymi procesu eksploatacji odpylacza. Uważam, że przegląd literatury w sposób dogłębny i wieloaspektowy odzwierciedla stan wiedzy związany z tematyką pracy doktorskiej. Rozdział ósmy dotyczy wszelkich aspektów technicznych i technologicznych obejmujących postać konstrukcyjną i technologią wytwarzania elektrod zbiorczych elektrofiltrów. Zaprezentowano różne kształty elektrod zbiorczych stosowanych w elektrofiltrach płytowych. Szeroko i dogłębnie opisano wszelkie aspekty związane z gatunkami stali z jakich produkuje się elektrody. Przedstawiono technologię wytwarzania (profilowania rolkowego) elektrod. Zaprezentowano najważniejszy parametr użytkowy elektrod, którym jest przyspieszenie normalne i styczne powierzchni elektrod, powodujące efektywne strzepywanie pyłu. Przedstawiono aspekty techniczne jakie należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu elektrofiltru. W rozdziale dziewiątym Doktorant przedstawił technologię wytwarzania elektrody zbiorczej począwszy od fazy zamówienia materiału poprzez przygotowanie procesu produkcyjnego (uzbrajanie i kalibracja profilarki) i jej kalibracji a skończywszy na kontroli jakości, magazynowaniu i spedycji wyprodukowanych elektrod. W rozdziale dziesiątym zaprezentowano wyniki badań wpływu składu chemicznego i właściwości mechanicznych wsadu technologicznego (blachy w kręgach) na tolerancje wykonania gotowego wyrobu. W rozdziale jedenastym pod tytułem: *Modelowanie numeryczne profilowania elektrody zbiorczej* zaprezentowano komercyjnie oprogramowanie do symulacji procesu technologicznego wytwarzania elektrod. Przedstawiono sposób



modelowania procesu wielotaktowego gięcia rolkowego elektrod zbiorczych, definicji modeli narzędzi (rolek profilujących) i wsadu, zaprezentowano sposób definicji modeli materiałowych wsadu. Przedstawiono najważniejsze wyniki (pocienienie, FLD, odkształcenia, sprężynowanie powrotne, siły występujące podczas procesu) uzyskane na drodze symulacji profilowania elektrod oraz podjęto próbę zinterpretowania tych wyników. W rozdziale dwunastym przedstawiono analizę wielkości geometrycznych elektrod zbiorczych na podstawie wyników symulacji numerycznych procesu ich wytwarzania. W rozdziale trzynastym Doktorant wykonał analizę drgań własnych i wymuszonych elektrod badając jak zmiana grubości elektrody wpływa na skuteczność strzepywania pyłu. Rozdziały czternasty, piętnasty i szesnasty były poświęcone czynnikom ekonomicznym, związanymi z produkcją elektrod. Przeanalizowano czynniki wpływające na zmniejszenie wielkości i jakości produkcji oraz zysku przed wprowadzeniem zmian modernizacyjnych. Oceniono opłacalność produkcji po proponowanych zmianach modernizacyjnych. Rozdział siedemnasty to obszernie podsumowanie całej rozprawy doktorskiej, w którym zawarto szereg cennych wniosków.

## **2. Ocena merytoryczna pracy**

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Tracza bardzo szeroko opisuje zagadnienia związane z procesem produkcji i eksploatacji elektrod, które są najważniejszym składnikiem elektrofiltrów. Elektrofiltry są stosowane w przemyśle energetycznym i mają bardzo ważne zadanie polegające na oczyszczaniu spalin z kotłów energetycznych. Podstawowym elementem konstrukcyjnym elektrofiltru są elektrody zbiorcze. Stanowią one 24% masy całego elektrofiltru, odpowiadają za skuteczność odpylania. Muszą być wyprodukowane w określonej dość wysokiej dokładności kształtowo – wymiarowej. Celem prowadzonych badań przez mgr inż. Pawła Tracza było opracowanie technologii produkcji elektrody zbiorczej z blachy o mniejszej grubości oraz tańszej w produkcji, w porównaniu do elektrod produkowanych obecnie. Doktorant zdefiniował trzy cele:

- cel merytoryczny, którym było opracowanie etapów złożonego procesu projektowania i produkcji elektrody o mniejszej grubości. Proces ten ma zaczynać się od analizy istniejącej linii technologicznej, właściwości wsadu, opracowanie stacji wielotaktowego gięcia rolkowego, przeprowadzenie symulacji procesu gięcia i oceny



wyników symulacji i sprawdzenie dokładności kształtowo-wymiarowych uzyskanego wyrobu,

- cel użytkowy, którym było opracowanie statystyczne właściwości chemicznych i mechanicznych wsadu technologicznego oraz oceny ich wpływu na cechy geometryczne gotowego wyrobu,

- cel naukowy, rozumiany jako identyfikacja na drodze symulacji numerycznych związku pomiędzy grubością blachy a procesem profilowania elektrod.

W zdefiniowanym celu merytorycznym jest zawarty również cel naukowy. Realizując cel merytoryczny przeprowadzono symulacje procesu profilowania elektrody i wyznaczono związki pomiędzy grubością blachy a wynikami symulacji profilowania blachy i tym samym zrealizowano cel naukowy. Należy podkreślić, że recenzowaną pracę doktorską cechuje wysoki poziom użyteczności.

Teza rozprawy została sformułowana na stronie siódmej w następujący sposób: *W oparciu o nowoczesne metody komputerowej symulacji, umożliwiające wariantową analizę procesu profilowania blachy oraz analizę danych materiałowych, takich jak właściwości mechaniczne i skład chemiczny możliwe jest opracowanie produkcji nowej, tańszej elektrody zbiorczej o mniejszej grubości od obecnie wytwarzanej.*

Uważam, że przedstawione w rozprawie doktorskiej cele zostały osiągnięte a postawioną tezę udowodniono.

Należy zauważyć, że Doktorant wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy naukowej i technicznej w zakresie analizowanej tematyki. Posiada duże doświadczenie zawodowe zdobyte podczas wieloletniej pracy zawodowej w byłej Fabryce Elektrofiltrów ELWO S.A. Szeroki zakres prowadzonych prac badawczych świadczy o dojrzałości naukowej Doktoranta.

Do głównych osiągnięć i zalet pracy doktorskiej zaliczyć można:

- trafny dobór tematyki badań, która jest bezpośrednią realizacją zapotrzebowania firm produkujących elektrody do elektrofiltrów,
- zaproponowanie autorskiej metodyki opracowania komputerowej symulacji technologii wykonania elektrod,



- interdyscyplinarne podejście do rozpatrywanego problemu poprzez uwzględnienie nie tylko aspektów technologicznych, ale też materiałowych i ekonomicznych procesu wytwarzania elektrod,
- wykorzystanie zaawansowanych komercyjnych narzędzi do symulacji procesu kształtowania elektrody oraz do analizy skuteczności strzepywania pyłu przez elektrodę,
- umiejętność wykorzystania zaawansowanych metod statystycznych do analizy parametrów materiałowych wsadu do produkcji elektrod.

### 3. Uwagi redakcyjne

Recenzowana praca doktorska jest bardzo obszerna, zawiera 225 stron tekstu. Uważam, że można było ją znacznie skrócić, bez szkody dla jej merytorycznej zawartości. Pod względem redakcyjnym praca jest zredagowana z właściwą starannością, jednakże w treści rozdziałów można znaleźć drobne błędy nie mające istotnego wpływu na merytoryczną ocenę pracy doktorskiej. Jest to na przykład, na stronie 30 akapit drugi zaczynający się od słów: *Można zauważyć, że czasy...* a kończący się słowami: *... gdzie aktualnie decydują niewielkie punkty procentowe.* Domyślam się, że autorowi chodziło o różnicach kosztów wytworzenia elektrod przez różne firmy. Na stronie 139 Doktorant pisze o mapach odkształceń plastycznych, powinno używać się pojęcia warstwice odkształceń. Można wskazać kilka rysunków z nieczytelnymi opisami (zbyt mała czcionka).

### 4. Uwagi krytyczne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

- Nie podano szczegółowych wytycznych i warunków technicznych w jakich mierzy się dokładność kształtowo-wymiarową produkowanych elektrod. Przy tak dużych gabarytach bardzo ważne są warunki techniczne wykonywania pomiarów a w szczególności pozycji lub sposobów podparcia elektrody podczas pomiaru, aby wyeliminować deformację elektrody pod ciężarem własnym.
- Obszernym rozdziałem pracy jest analiza statystyczna wpływu składu chemicznego i właściwości mechanicznych materiału wsadu na dokładność kształtowo-wymiarową wykonania gotowej elektrody. Proces technologiczny



profilowania odbywał się na profilarce Daniel Smith LTD. Badania wykonano na próbie 816 sztuk wyprodukowanych elektrod z 12 kręgów stali pochodzących z 7 wytopów. Nie podano informacji na temat nastaw profilarki oraz parametrów jej pracy podczas profilowania. Czy parametry pracy profilarki dla wszystkich 816 prób były takie same, czy warunki smarowania były takie same, co z zużyciem powierzchni rolek? Czy i w jaki sposób wyeliminowano wpływ warunków profilowania na tolerancję wykonania gotowych elektrod. Może się okazać, że wpływ warunków profilowania na tolerancję wykonania jest większy niż wpływ analizowanych parametrów.

- Czy na podstawie wyników analizy statystycznej składu chemicznego materiału wsadu na dokładność kształtowo-wymiarową produkowanych elektrod można sformułować wniosek, że aby osiągnąć największą możliwą dokładność kształtowo-wymiarową należy zastosować stal o określonym składzie chemicznym? Byłoby to potencjalne zalecenie dla producenta stali.
- Brakuje precyzyjnych informacji na temat typów elementów skończonych wykorzystanych do budowy modelu wsadu i rolek w celu wykonania symulacji procesu profilowania. Na stronie 136 Doktorant podał informację, że standardowym elementem skończonym do dyskretyzacji wsadu jest ośmiowęzłowy element skończony. Wsad był zdyskredytowany jedną warstwą tych elementów. Czy jedna warstwa elementów na grubości wsadu jest wystarczająca dla tego typu obliczeń? Czy stosowano automatyczne zagęszczanie siatki w miejscach największych deformacji podczas symulacji kształtowania elektrody?
- Na stronie 136 Doktorant stwierdza, że wcześniejsze próby zastosowania elementów powłokowych nie pozwoliły na otrzymanie wiarygodnych wyników symulacji. Stwierdzenie to zostało poparte jedną pozycją literaturową, którą były materiały szkoleniowe. Nie zgadzam się z tym stwierdzeniem. Być może są to ogólne zalecenia do oprogramowania COPRA, lecz nie można ich uogólniać do symulacji profilowania blach w innych systemach obliczeniowych. Czy rozpoznawano przydatność innego oprogramowania do tego typu symulacji?
- W jaki sposób wyznaczono parametry krzywej umocnienia ( $\epsilon_0$ ,  $K$  i  $n$ ) dla zastosowanych stali?



- W symulacjach numerycznych procesu profilowania nie uwzględniono ważnego zjawiska jakim jest tarcie, argumentując to uproszczenie długimi czasami obliczeń oraz braku danych na temat wartości współczynnika tarcia. Czy dopuszczalne jest pominięcie tego składnika podczas symulacji? Czy przeanalizowano jaki to mogło mieć wpływ na wyniki symulacji?

## 5. Wnioski końcowe

Rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Tracza dotyczy opracowania autorskiej metodyki sposobu wykonania nowej elektrody zbiorczej, która w założeniu ma być tańsza w produkcji od obecnie stosowanej. W pracy autor wykazał się znajomością współczesnych narzędzi do komputerowych symulacji procesu plastycznego kształtowania blach. Należy też podkreślić złożoność podjętego tematu badań. Doktorant nie tylko zajął się technologią wykonania elektrody z blach o mniejszej grubości, ale w swych badaniach uwzględnił też różne właściwości materiału wsadu oraz bardzo ważne aspekty ekonomiczne procesu wytwarzania elektrod.

Doktorant trafnie sformułował problem badawczy i przedstawił jego autorskie rozwiązanie. Opracowane podczas realizacji pracy doktorskiej metody symulacji komputerowych oraz badań doświadczalnych wskazują na odpowiednie przygotowanie Doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowo-badawczej.

Recenzowana dysertacja spełnia na dobrym poziomie ustawowe wymagania stawiane pracy doktorskiej w zakresie nauk technicznych. Biorąc pod uwagę wskazane powyżej konkluzje, wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Pawła Tracza do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Bielsko-Biała, 02.10.2023

*Janeusz Włóka*